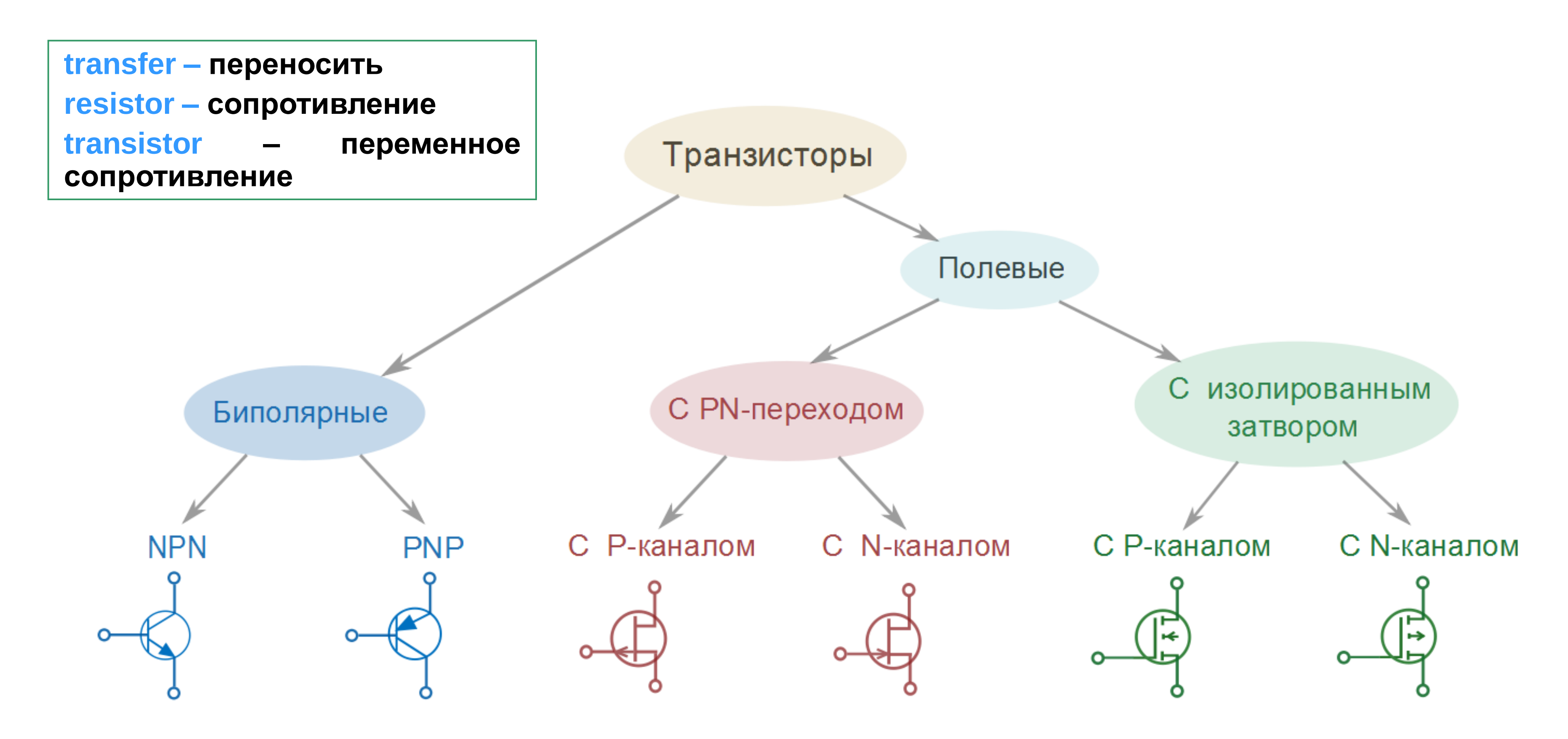
Транзисторы

Транзисторы – полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Позволяют регулировать ток в электрической цепи.

transfer – переносить
resistor – сопротивление
transistor – переменное сопротивление

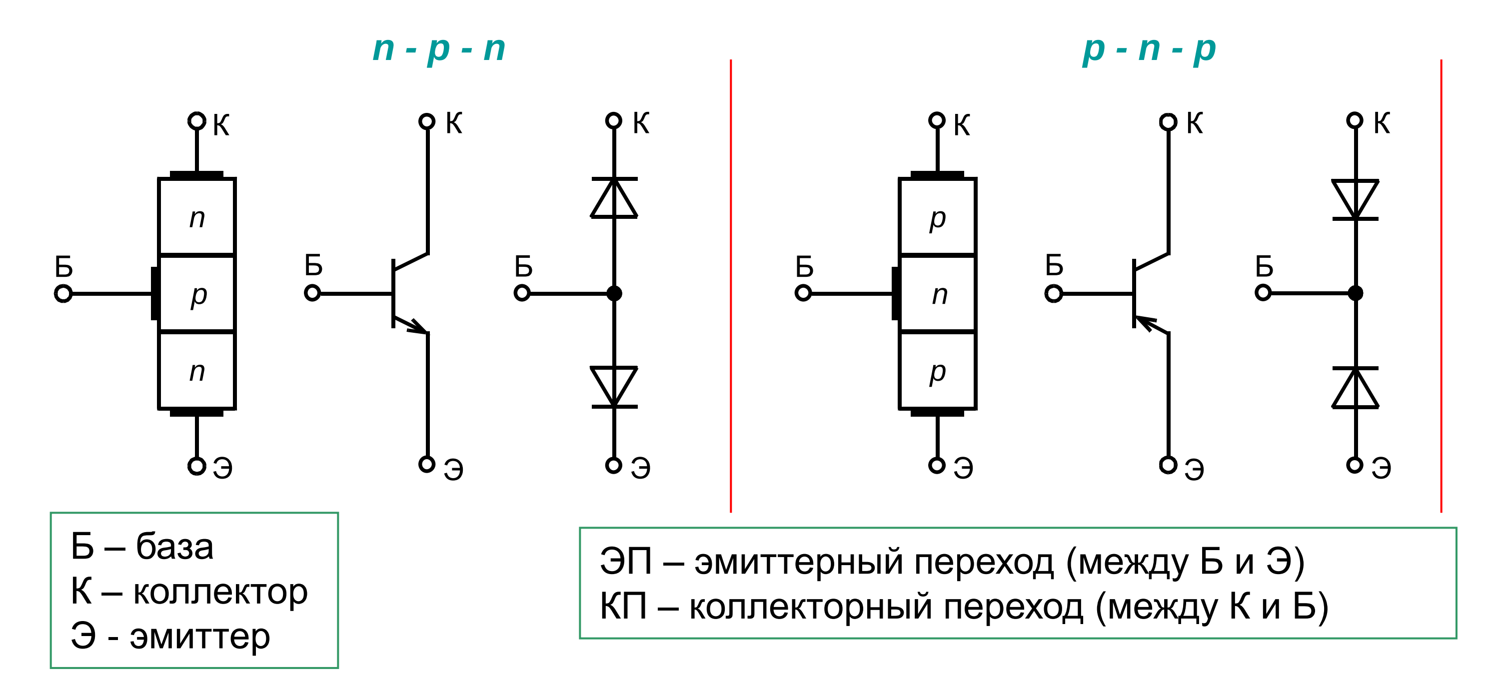


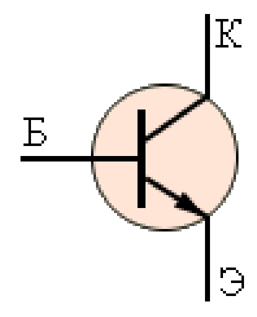
Классификация основных типов транзисторов и обозначение на схеме

Биполярные транзисторы (BJT)

Биполярные транзисторы – полупроводниковые приборы с двумя взаимодействующими *p*-*n*-переходами и тремя выводами.

Термин «биполярный» - используются носители обоих знаков: электроны и дырки.





УГО транзистора. Стрелка показывает направление тока эмиттера при прямом смещении эмиттерного перехода

Б – база
К – коллектор
Э - эмиттер

ЭП – эмиттерный переход (между Б и Э)
КП – коллекторный переход (между К и Б)

На пластинке полупроводника создаются три области различной электропроводности. В зависимости от порядка расположения областей различают *n - p - n* и *p - n - p*-транзисторы.

Расстояние между переходами (толщина базового слоя - базы) весьма мало – единицы мкм. Концентрация примесей в коллекторе и эмиттере значительно больше, чем в базе.

Режимы работы биполярного транзистора

1. **активный** (усилительный) используется в усилителях и генераторах:
   КП смещен в обратном направлении;
   ЭП смещен в прямом направлении;
2. **режим отсечки** (транзистор заперт) используется в ключевых схемах (ключ разомкнут);
   КП, ЭП смещены в обратном направлении;
3. **режим насыщения** (транзистор открыт) используется в ключевых схемах (ключ замкнут);
   КП, ЭП смещены в прямом направлении;
4. **инверсный режим** (К и Э меняют местами) используется редко, т.к. все параметры падают:
   КП смещен в прямом направлении;
   ЭП смещен в обратном направлении.

В схемах с транзисторами, как правило, образуется две цепи:
входная цепь – служит для управления транзисторами
выходная цепь – служит для подключения нагрузки.

Принцип действия биполярного транзистора

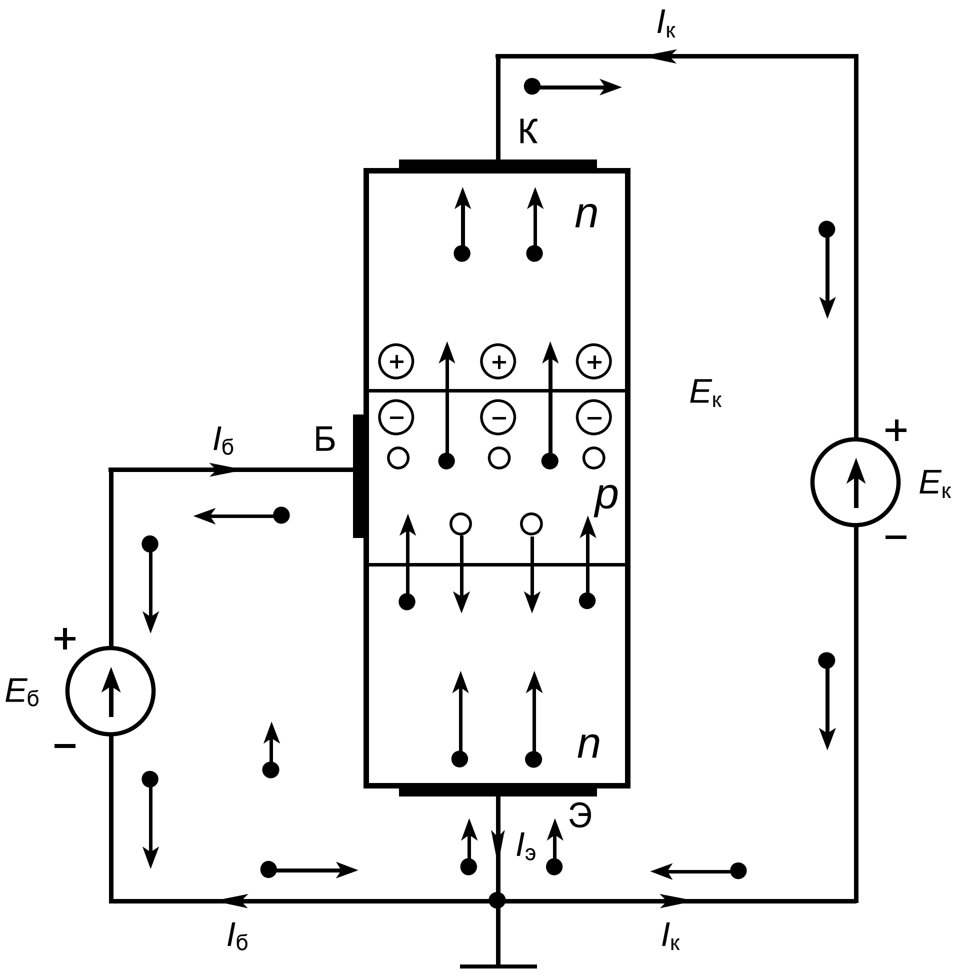
Рассмотрим физические процессы в транзисторе на примере *n-p-n*-транзистора, работающего в активном режиме без нагрузки (статический режим).

Напряжения на переходах задаются внешними источниками постоянного напряжения $E_б$ и $E_к$. Их полярность и величина напряжения обеспечивают смещение ЭП в прямом направлении, а КП – в обратном, т.е. активный режим работы:

$E_б$ (десятые доли В) < $E_к$ (единицы   сотни В).

Потенциал базы меньше потенциала коллектора, => КП смещен в обратном направлении, при этом сопротивление ЭП малó, а сопротивление КП великó.

Физика процессов



Так как ЭП смещен в прямом направлении, то потенциальный барьер (как в обычном *p*-*n*-переходе) в этом переходе понижен, поэтому электроны легко, его преодолевая, инжектируются из эмиттера в базу.

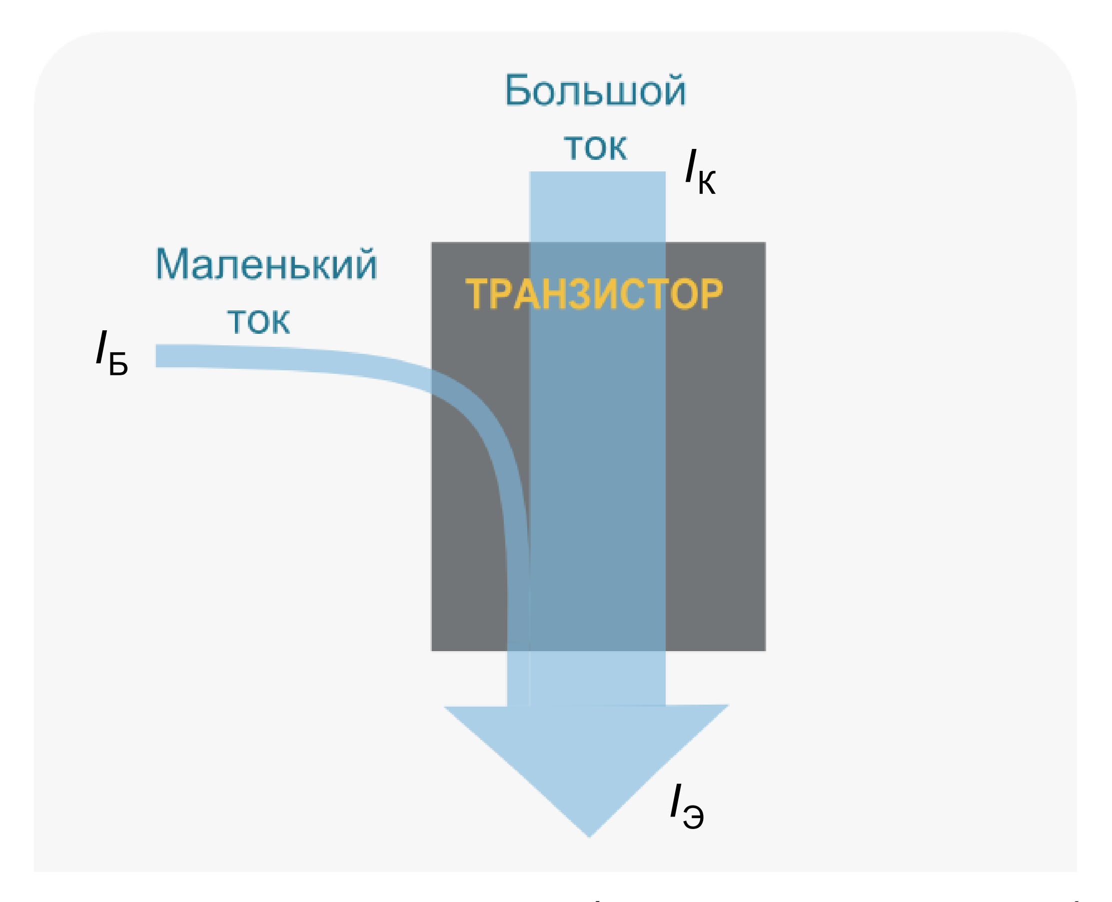
Небольшая часть электронов (≈5%) в базе рекомбинируют с дырками и в результате возникает сравнительно небольшой базовый ток $I_б$ (дырок в базе мало, т.к. толщина база мала), а бо́льшая оставшаяся часть электронов (≈95%) достигает коллекторного перехода. Поскольку КП смещен в обратном направлении, то на этом переходе образуются объемные заряды (подобно обычному *p*-*n*-переходу при обратном напряжении). Между зарядами возникает электрическое поле, которое способствует продвижению (экстракции) через КП электронов из эмиттера. Эти электроны и создают коллекторный ток.

Ток коллектора $I_к$ получается меньше тока эмиттера $I_э$ на величину тока базы $I_б$. В соответствии с 1 законом Кирхгофа между токами всегда справедливо соотношение:

$$I_э = I_к + I_б,$$

т.к. $I_б << I_э$, то $I_э \approx I_к$.

Ток базы $I_б$ стараются сделать как можно меньше (считают его бесполезным). С этой целью базу делают очень тонкой и уменьшают концентрацию примесей (дырок). В этом случае меньшее число электронов будет рекомбинировать в базе с дырками и следовательно $I_б$ будет меньше.



Демонстрация протекания токов биполярного транзистора (n-p-n)

Физические процессы в *p-n-p* транзисторе подобны процессам, рассмотренным для *n-p-n* транзистора.

Для перехода от одного типа транзистора к другому необходимо:

1. поменять носители: дырки и электроны;
2. изменить полярности напряжений на противоположные;
3. изменить направление токов в транзисторе.

При изменении напряжений на КП и ЭП происходит изменение толщины этих переходов, а => меняется толщина базы. Это явление (эффект) называется ***модуляцией толщины базы***.

Соотношения между токами транзистора

Ранее было показано, что $I_к < I_э$ из-за тока базы. Поэтому можно записать:

$$I_к = \alpha \cdot I_э$$

Чем меньше $I_б$, тем ближе $\alpha \to 1$.

где α – коэффициент передачи тока эмиттера.

$\alpha_{тип}$ = 0,950   0,998

Выразим $I_к$.

$$I_к = \alpha \cdot I_э = \alpha \cdot I_к + \alpha \cdot I_б \Rightarrow I_к(1-\alpha) = \alpha \cdot I_б \Rightarrow$$

$$I_к = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_б = \beta \cdot I_б$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

- коэффициент передачи тока базы (десятки   сотни).

$$I_к = \beta \cdot I_б$$

Видно, что между током базы и током коллектора существует линейная связь, поэтому говорят, что транзистор управляется током $I_б$.

Зная β, можно рассчитать α по формуле: $\alpha = \dfrac{\beta}{1+\beta}.$

Коэффициенты α, β зависят от режима работы транзистора. Максимум их достигается при средних токах, а при малых и больших данные коэффициенты снижаются.

Через обратно смещенный КП всегда протекает тепловой (обратный) ток . Различают два вида тока:

$I_{к0}$ – обратный ток, протекающий из коллектора в базу (для *n-p-n* транзистора), составляет единицы мкА. В справочниках может обозначаться как $I_{КБ0}$. Данный ток определяется при оторванном проводе эмиттера, т.е. $I_э = 0$.

$I_{к0}$ – **сквозной** или **начальный ток**, протекающий из коллектора в эмиттер (для *n-p-n* транзистора) через все переходы, определяется про оторванной базе, т.е. $I_б = 0$, составляет десятки   сотни мкА.

С учетом обратного тока коллекторный ток равен:

$$I_к = б \cdot I_э + I_{к0},$$

т.к. $I_э >> I_{к0}$, то $I_к \cong \alpha \cdot I_э$.

Выразим $I_к$ с учетом $I_{к0}$: $I_к = \alpha \cdot I_э + I_{к0} = \alpha \cdot (I_к + I_б) + I_{к0} \Rightarrow$

$$I_к(1-\alpha) = \alpha \cdot I_б + I_{к0} \Rightarrow I_к = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_б + \frac{I_{к0}}{1-\alpha} = \beta \cdot I_б + I_{к0(э)}.$$

$$I_к = \beta \cdot I_б + I_{к0(э)}$$

При $I_б = 0$

$$I_к = I_{к0(э)} = \frac{I_{к0}}{1-\alpha} = \frac{\alpha}{1-\dfrac{\beta}{\beta+1}} = \frac{I_{к0}(\beta+1)}{\beta+1-\beta} = I_{к0}(\beta+1) \cong I_{к0} \cdot \beta.$$

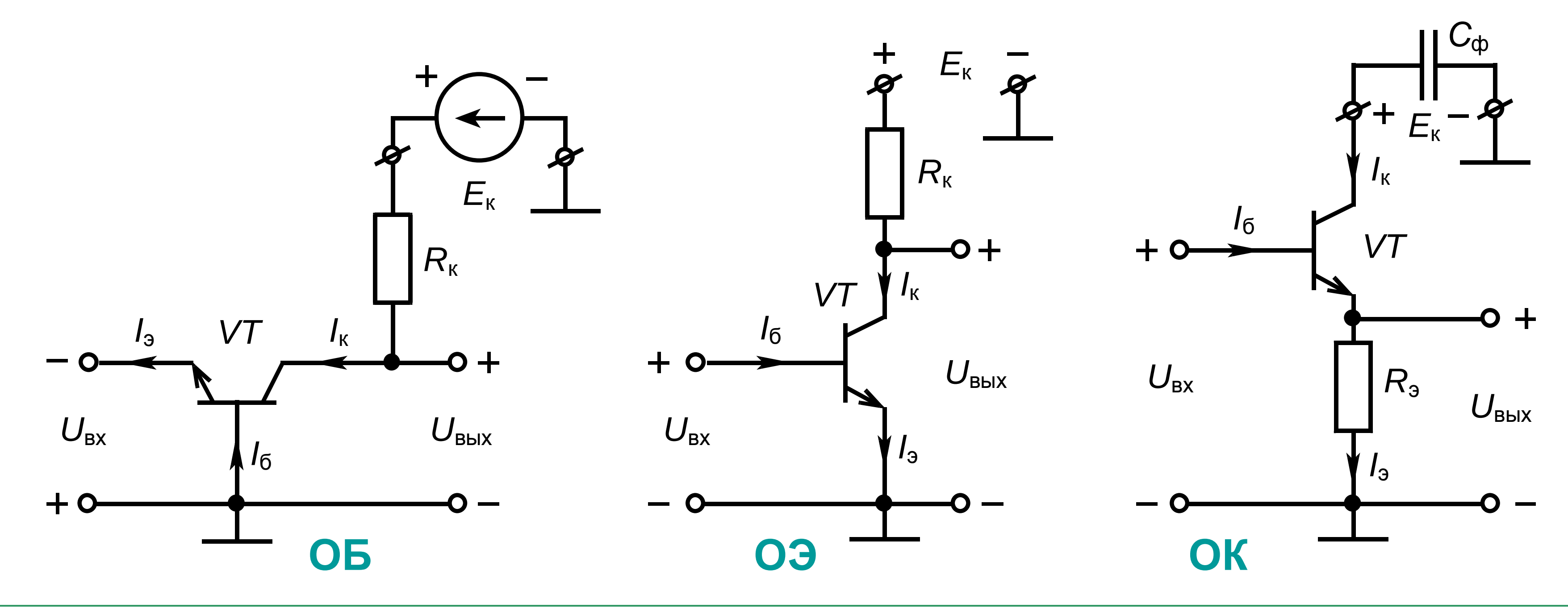
$$I_{к0(э)} >> I_{к0}$$

Схемы включения биполярного транзистора

На практике применяют три основных схемы включения транзисторов:

- с общим эмиттером (ОЭ);
- с общей базой (ОБ);
- с общим коллектором.

Правило! Тип схемы включения определяется по выводу (электроду) транзистора, который является общим для входной и выходной цепей по переменному току.



В схеме ОК коллектор соединен с общей точкой схемы, входом и выходом через источник $E_к$ по переменной составляющей, для которой $C_ф$ является закороткой.

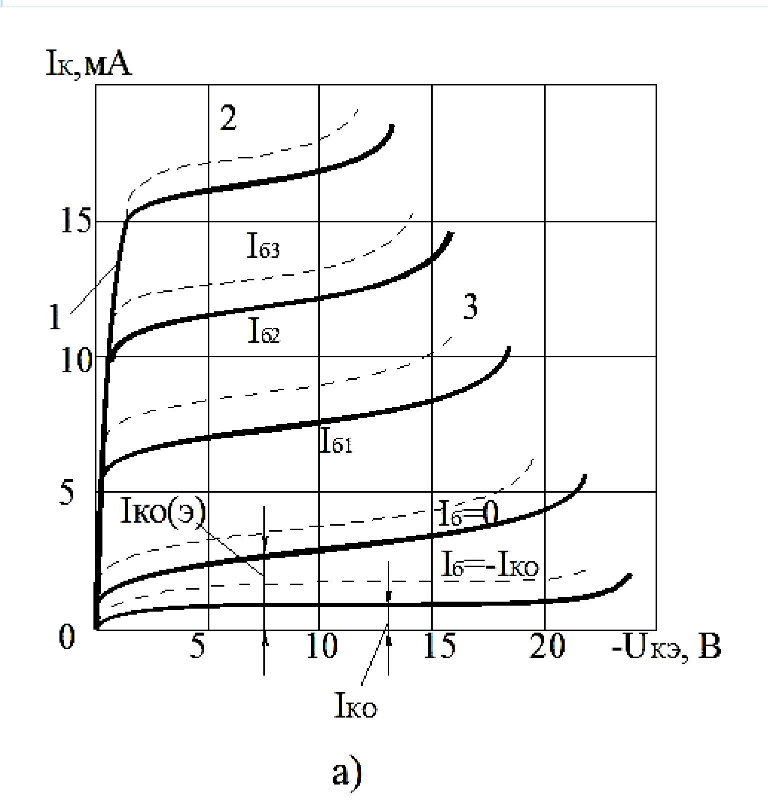
Отсюда, требование к источнику $E_к$: для переменного тока его внутреннее сопротивление должно быть равно нулю!

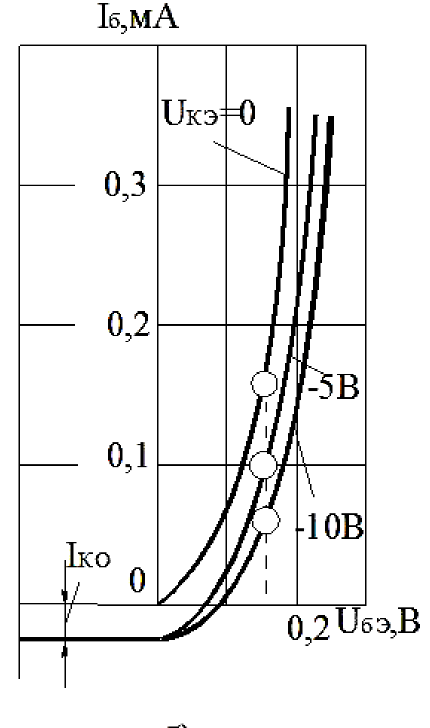
Статические вольт-амперные характеристики биполярного транзистора

Статические характеристики снимаются на постоянном токе и без нагрузки в выходной цепи. Данные характеристики используются для расчета транзисторных схем. На практике интересны входные и выходные характеристики. Входные ВАХ отражают зависимость напряжения и тока во входной цепи, выходные ВАХ – в выходной цепи.

Для каждой из схем включения транзистора имеют место быть свои характеристики. Наиболее распространены ВАХ для схем ОЭ и ОБ, которые и приводятся в справочниках.

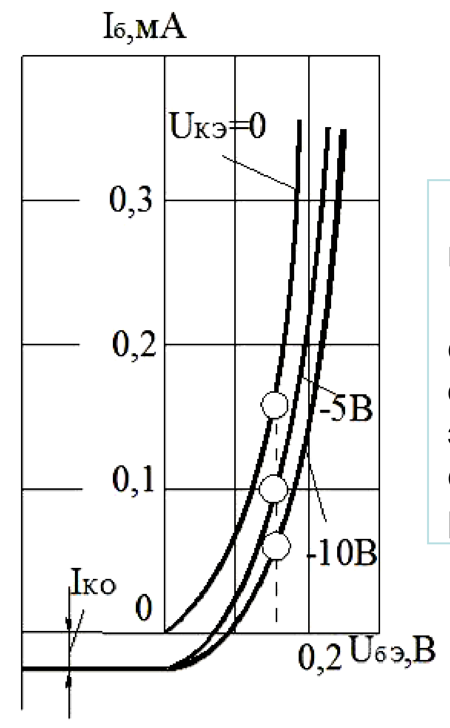
Входные и выходные ВАХ подобны ВАХ полупроводникового диода. Входные х-ки относятся к прямо смещенному ЭП, поэтому они подобны прямой ветви ВАХ диода. Выходные х-ки отражают свойства обратно смещенного коллекторного перехода и аналогичны обратной ветви ВАХ диода.





ВАХ биполярного транзистора (p-n-p) в схеме ОЭ: а) выходные; б) входные.

Схема ОЭ

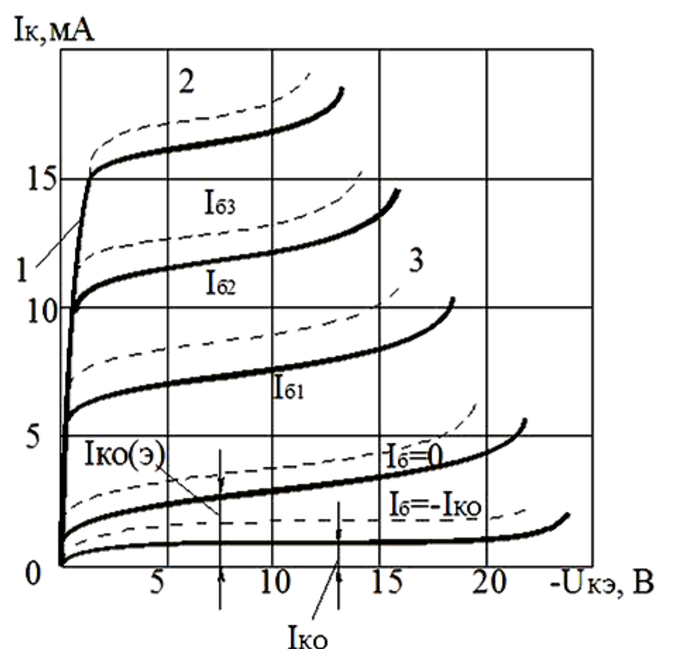


Входные характеристики $I_б = f(U_{бэ})\big|_{U_{кэ}=\text{const}}$

При $U_{кэ}$ = 0 входная х-ка представляет собой прямую ветвь ВАХ двух параллельно включенных диодов.

При $U_{кэ}$ < 0 характеристики сдвинуты вправо и вниз относительно предыдущего случая. Смещение вниз вызвано протеканием встречно основному базовому току обратного тока $I_{к0}$, и при $U_{бэ}$ = 0 значение $I_б$ < 0. Смещение х-к вправо обусловлено эффектом модуляции базы: с ростом $U_{кэ}$ растет $U_{кб}$ => толщина обратно смещенного КП увеличивается, а толщина базы уменьшается => в базе рекомбинирует меньше носителей и => ток $I_б$ уменьшается.

Входные х-ки при $U_{кэ}$ < 0 расположены близко друг к другу, поэтому в справочниках, как правило, приводят одну х-ку при заданном $U_{кэ}$ и иногда при $U_{кэ}$ = 0.



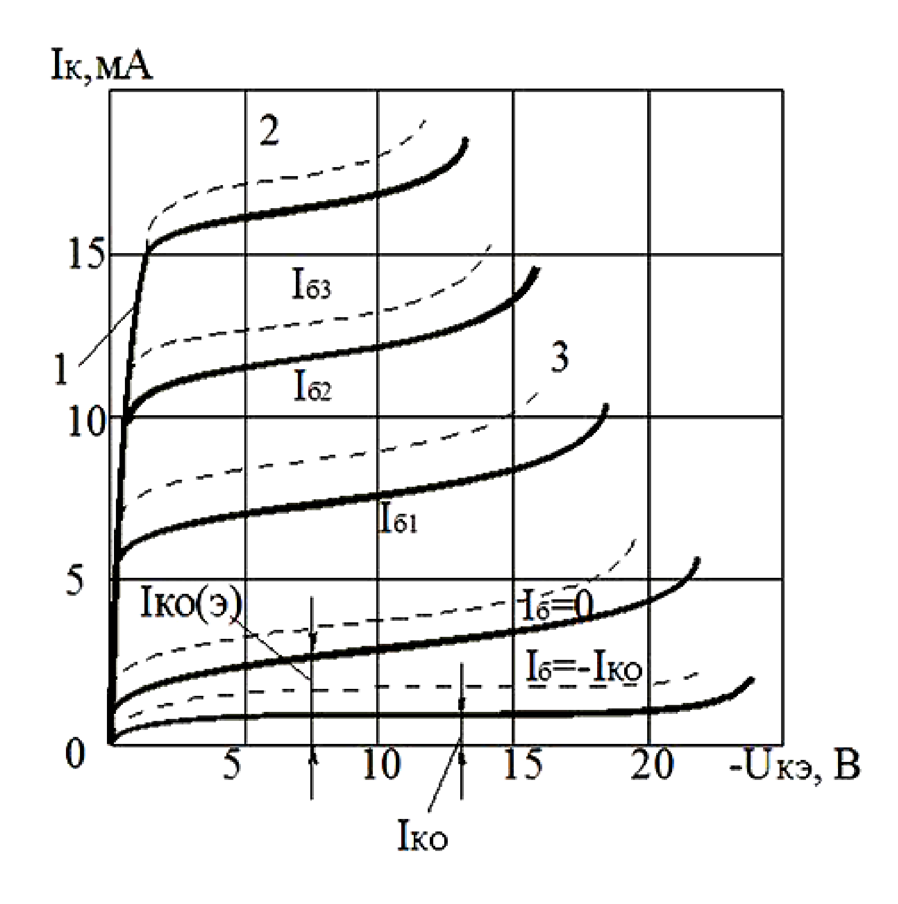
Выходные характеристики $I_к = f(U_{кэ})\big|_{I_б=\text{const}}$

Первая снизу х-ка соответствует режиму глубокой отсечки, когда $U_{бэ}$ > 0. При этом ЭП и КП заперты ($I_б = -I_{к0}$). Из Б в К течет тепловой ток $I_{к0}$.

Характеристика при $I_б$ = 0 соответствует режиму с оторванной базой, т.е. $I_к = \beta \cdot I_б + I_{к0(э)} = I_{к0(э)} = (1+\beta) \cdot I_{к0}$, при этом из Э в К течет сквозной ток $I_{к0(э)}$.

На выходных характеристиках можно выделить три области.

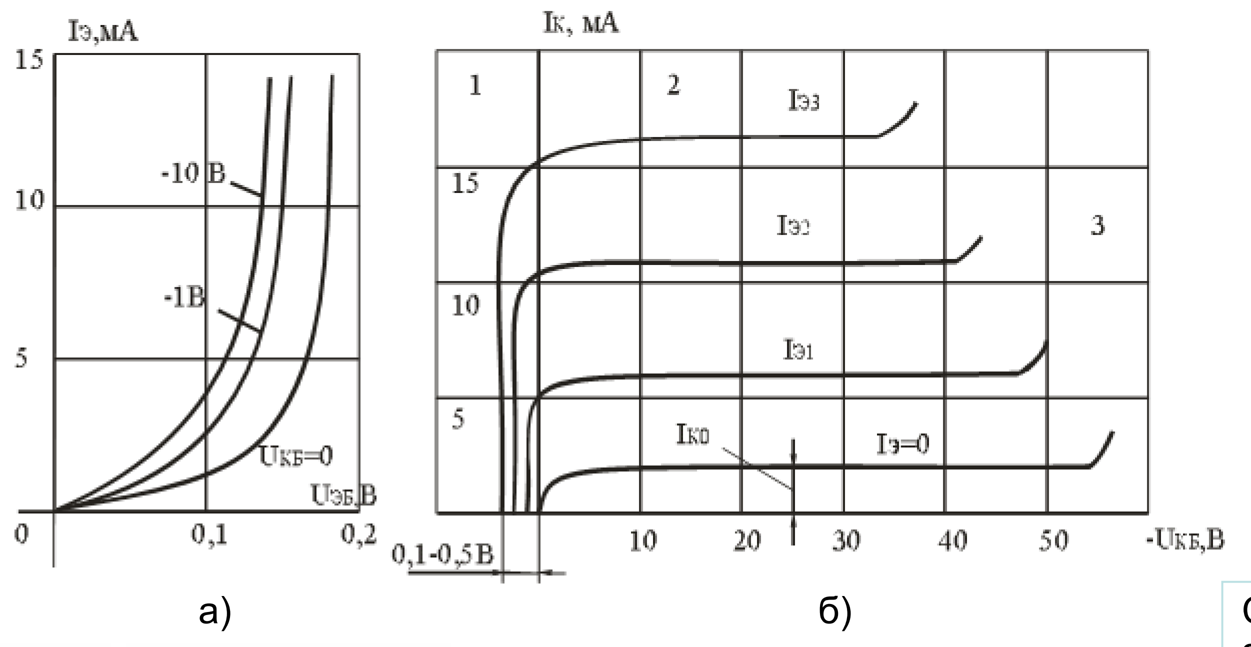
1. Нелинейная область с сильной зависимостью $I_к$ от $U_{кэ}$. При малых $U_{кэ}$ и $U_{бэ}$ < 0 КП смещен в прямом направлении (режим насыщения).
2. Линейная область. КП смещен в обратном направлении (активный режим). Здесь наблюдается слабая зависимость $I_к$ от $U_{кэ}$. Небольшой подъем характеристик объясняется эффектом модуляции базы.



Эффект модуляции. При увеличении $U_{кэ}$ толщина базы уменьшается => ток $I_б$ уменьшается (аналогично случаю для входной х-ки), но т.к. ток базы необходимо поддерживать постоянным ($I_б$ = const) приходится увеличивать по модулю $U_{бэ}$. За счет этого ток $I_б$ увеличивается, и ток $I_к = I_б \cdot \beta$ тоже возрастает.

3. Область пробоя КП. Как правило, это нерабочая область за исключением специальных типов транзисторов.

Схема ОБ



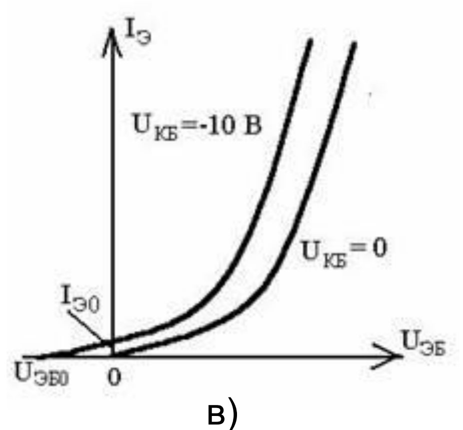
а) б)

Входная характеристика (рис. а)

$$I_э = f(U_{эб})\big|_{U_{кб}=\text{const}}$$

Х-ки, снятые при большем $U_{кб}$ сдвинуты влево и вверх относительно случая $U_{кб}$ = 0. Х-ки подняты вверх за счет протекания сквозного тока $I_{к0(э)}$ через ЭП, что явно видно при $U_{эб}$ = 0 (рис. в).

Сдвиг характеристик влево обусловлен эффектом модуляции базы.



в)

Выходные характеристики (рис. б)

$$I_к = f(U_{кб})\big|_{I_э=\text{const}}$$

Выходные ВАХ имеют три области:

1. Нелинейная область с сильной зависимостью $I_к$ от $U_{кб}$ (режим насыщения). Находится левее оси ординат.

2. Линейная область со слабой зависимостью $I_к$ от $U_{кб}$ (активный режим). Ее особенностью является небольшой подъем характеристик (меньший, чем у сх. ОЭ), обусловленный эффектом модуляции базы.

3. Область пробоя. При некотором $U_{кб}$ начинается электрический пробой КП и ток $I_к$ резко возрастает.

Самая нижняя характеристика при $I_э$ = 0 соответствует режиму с оторванным эмиттером. Это значит, что напряжение приложено только к КП и через него в базу течет обратный ток $I_{к0}$.

Схемы для снятия ВАХ биполярного транзистора

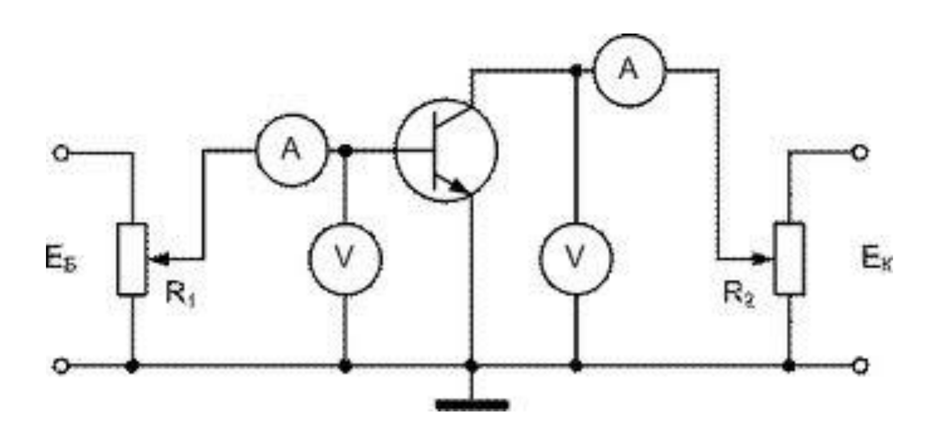


Схема ОЭ

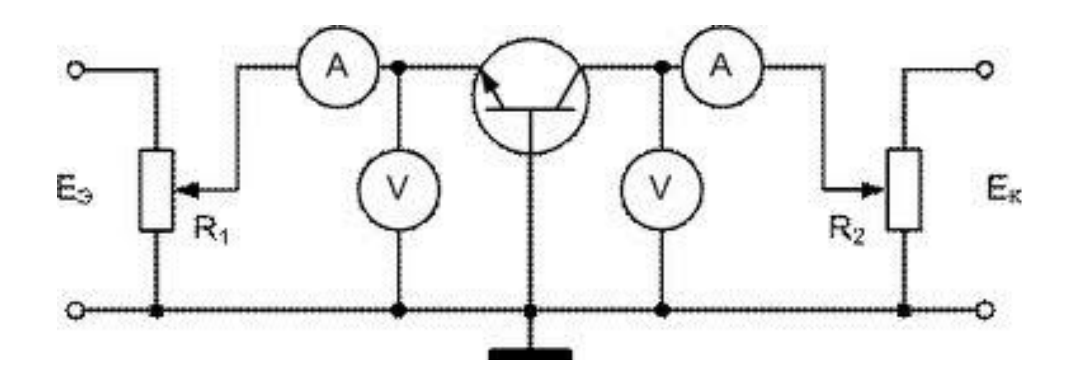
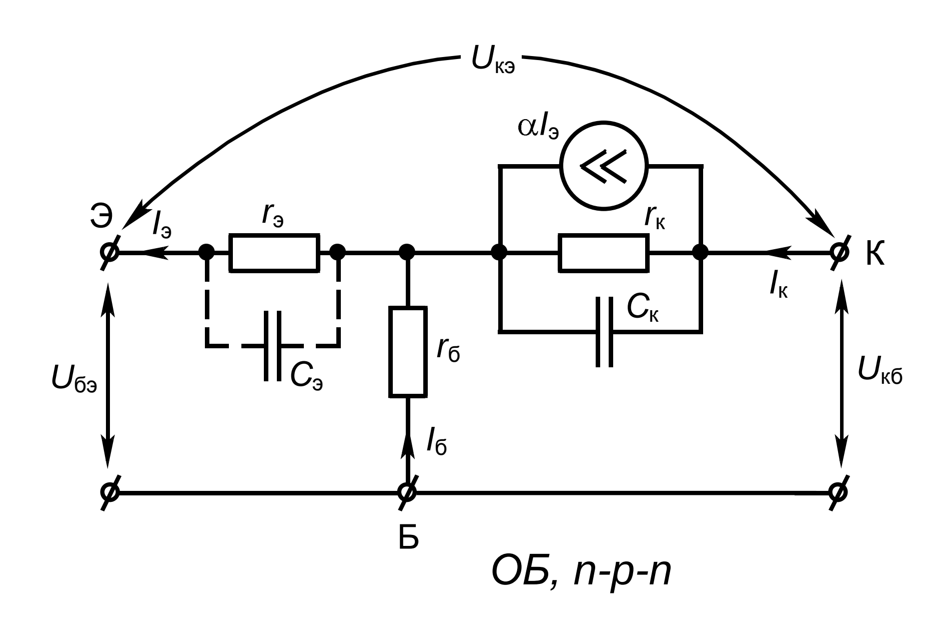


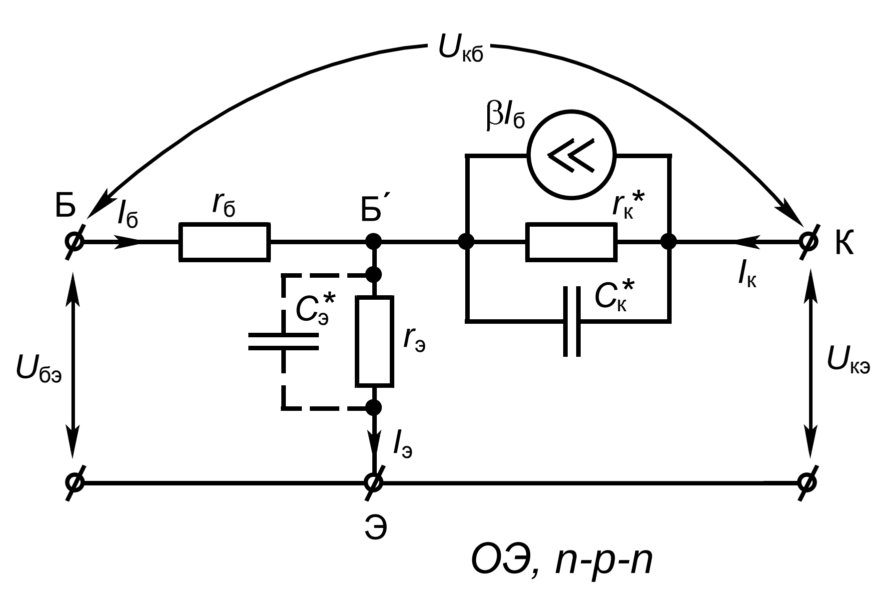
Схема ОБ

*R*1, *R*2 – переменные резисторы, предназначенные для регулировки напряжения.

Схемы замещения биполярного транзистора в физических параметрах



ОБ, n-p-n



ОЭ, n-p-n

Т – образные малосигнальные схемы замещения построены с помощью физических (внутренних) параметров транзистора, которые характеризуют физические свойства трехслойной полупроводниковой структуры транзистора. Состав этих схем одинаков.

Границы применимости схем замещения:

1) транзисторы работают в активном режиме;
2) справедливы для переменных составляющих токов и напряжений (название «схема замещения на переменном токе»);
3) справедливы для транзисторов, работающих на линейных участках входных и выходных статических характеристик.

Так как значения переменных составляющих токов и напряжений транзистора, как правило, значительно меньше постоянных составляющих, то данные схемы замещения называют **малосигнальными**, а их параметры – малосигнальными.
Все сопротивления, входящие в схемы являются дифференциальными , т.е. определяются для приращений (изменений) тока и напряжения.

Элементы схемы замещения

$r_б$ – объемное сопротивление базового слоя (базы), справочный параметр, иногда приводится в справочниках и составляет 100   400 Ом.

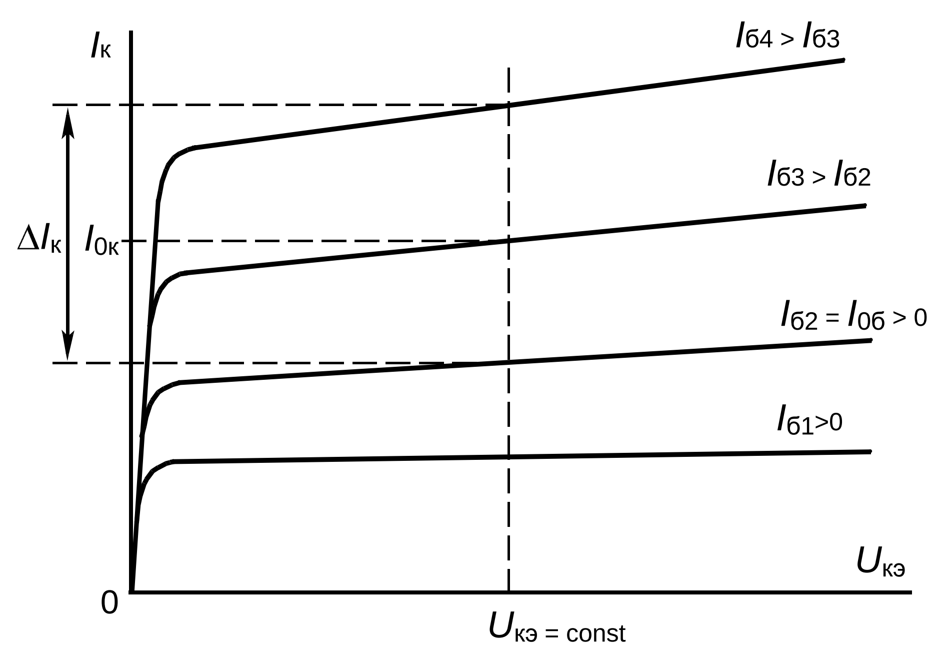
$r_э$ – дифференциальное сопротивление прямо смещенного эмиттерного перехода. Величина $r_э$ зависит от величины постоянной составляющей эмиттерного тока $I_{0э}$ (тока покоя эмиттера) и определяется:

$$r_э = \frac{\varphi_T}{I_{0э}}; \quad \varphi_T = \frac{k \cdot T}{e},$$

где φ_T – температурный потенциал.

Пример: если $I_{0э}$ = 1мА, то $r_э$ ≈ 26 Ом при t = 27 C.

Ориентировочные значения: **$r_э$ = единицы десятки Ом**.



Пример определения приращений тока для расчета β

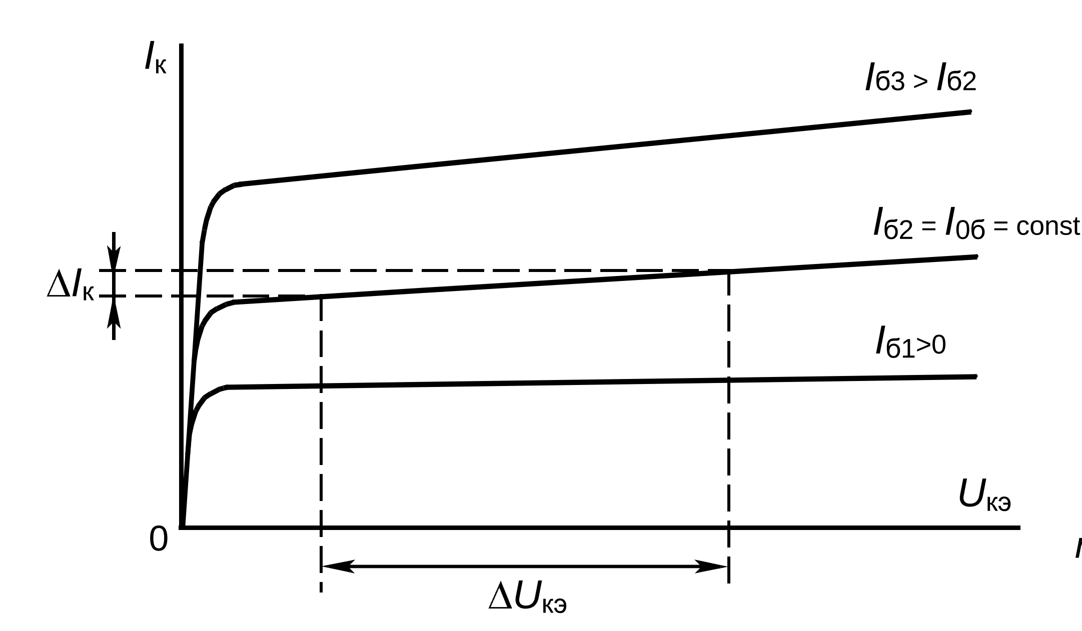
$\beta \cdot I_б$ – эквивалентный источник тока, учитывающий зависимость коллекторного тока от базового.

β – динамический коэффициент передачи тока базы; определяется по выходным характеристикам для сх. ОЭ:

$$\beta = \left.\frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}\right|_{U_{кэ}=\text{const}}$$

$$\alpha = \left.\frac{\Delta I_к}{\Delta I_э}\right|_{U_{кб}=\text{const}}$$

- динамический коэффициент передачи тока эмиттера; может быть определен по выходным х-кам сх. ОБ.



Пример определения приращений тока и напряжения для расчета $r_к$*

$r_к^* = r_{к(э)}$ – дифференциальное сопротивление обратно смещенного КП (справочный параметр):

$$r_к^* = r_{к(э)} = \left.\frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_к}\right|_{I_б = \mathrm{const}} .$$

$r_к^*$ = десятки   сотни кОм.

$r_к = r_{к(б)} = r_{к(э)}(1+\beta)$ - сх. ОБ (сотни кОм   единицы МОм).

$C_к^* = C_{к(э)}$ – емкость обратно смещенного КП – справочный параметр: $C_{к(э)}$ = единицы   сотни пФ. Зависит от частотных свойств транзистора.

Чем меньше $C_{к(э)}$, тем лучше частотные свойства!

$$C_к = C_{к(б)} = \frac{C_{к(э)}}{1+\beta} \approx \frac{C_{к(э)}}{\beta}$$ - емкость обратно смещенного КП в сх. ОБ

$$\tau_{Ск} = C_к^* \cdot r_к^* = C_к \cdot r_к = \mathrm{const}$$

$C_э^* = C_{э(э)}$ – емкость эмиттерного перехода. Обычно в расчетах не учитывается, т.к. $\tau_{вх} < \tau_{вых}$.

$C_э^* = C_{э(э)}$ – единицы   сотни пФ.

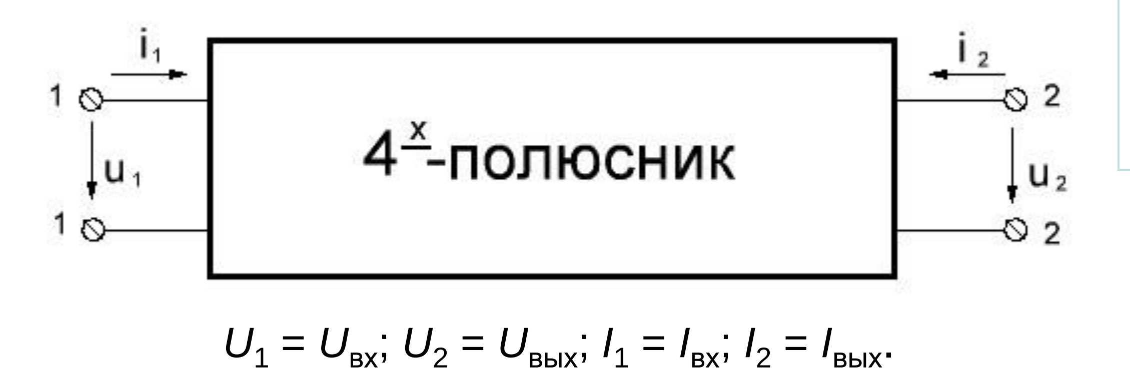
Полагают: $C_{э(э)} = C_{э(б)}$

При анализе малосигнальных схем замещения (напр., усилительных каскадов) рассматриваются только переменные составляющие токов и напряжений, следовательно все принятые обозначения $I_б$, $I_к$, $I_э$, $U_{бэ}$, $U_{кэ}$, $U_{бэ}$ и др. характеризуют действующие значения гармонического сигнала, т.е. $I_m = \sqrt{2} \cdot I_{дейст}$

h - параметры транзистора

Физические параметры, входящие в Т-образную схему замещения транзистора не могут быть измерены напрямую, т.к. слои и и переходы транзистора недоступны для подключения измерительных приборов. Поэтому в качестве измеряемых параметров выбраны те, которые отражают свойства транзистора как четырехполюсника.

При любой схеме включения транзистор может быть представлен в виде активного (линейного) четырехполюсника – «черного ящика».



$U_1 = U_{вх}$; $U_2 = U_{вых}$; $I_1 = I_{вх}$; $I_2 = I_{вых}$.

На входе действует переменное напряжение U_1 и протекает переменный ток I_1, а на выходе действует переменное напряжение U_2 и переменный ток I_2.

Существуют различные системы параметров, которые связывают переменные токи и напряжения в четырехполюснике. Наиболее удобными для измерения считаются *h* - параметры.

«*h*» от слова «*hybrid*» - гибридное или смешанные. Включают в себя: 2 коэффициента, одно сопротивление, одну проводимость. Приводятся в справочниках.

Система уравнений, связывающая токи и напряжения через *h* - параметры:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$

h - параметры – соответствующие коэффициенты.

Физический смысл коэффициентов (*h* - параметров) в уравнениях

$$h_{11} = \left.\frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}\right|_{\Delta U_2=0}$$

- входное сопротивление транзистора переменному току при неизменном выходном напряжении (по переменке на выходе К.З., т.е. переменки нет, т.е U_2 = const);

$$h_{21} = \left.\frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}\right|_{\Delta U_2=0}$$

- коэффициент передачи по току при неизменном выходном напряжении (по переменке на выходе К.З., т.е. переменки нет, т.е U_2 = const);

$$h_{12} = \left.\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}\right|_{\Delta I_1=0}$$

- коэффициент обратной связи по напряжению при неизменном входном токе, показывает какая часть переменного выходного напряжения передается на вход транзистора из-за наличия обратной связи в нем (по переменке входная цепь разрыв, т.е. I_1 = const);

$$h_{22} = \left.\frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}\right|_{\Delta I_1=0}$$

- выходная проводимость транзистора при неизменном входном токе транзистора (по переменке входная цепь разрыв, т.е. I_1 = const), измеряется в сименсах.

Значения *h* – параметров зависят от схемы включения:

Схема ОЭ: $I_1 = I_б$; $I_2 = I_к$; $U_1 = U_{бэ}$; $U_2 = U_{кэ}$.

Схема ОБ: $I_1 = I_э$; $I_2 = I_к$; $U_1 = U_{эб}$; $U_2 = U_{кб}$.

h – параметры для схемы ОЭ

$$h_{11Э} = \left.\frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б}\right|_{U_{кэ}=\mathrm{const}} = r_{вх}$$

- входное сопротивление транзистора переменному току; определяется по входной характеристике;

$$h_{21Э} = \left.\frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}\right|_{U_{кэ}=\mathrm{const}} = \beta$$

- коэффициент передачи тока базы; определяется по выходным характеристикам;

$$h_{12Э} = \left.\frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}}\right|_{I_б=\mathrm{const}} = \varepsilon$$

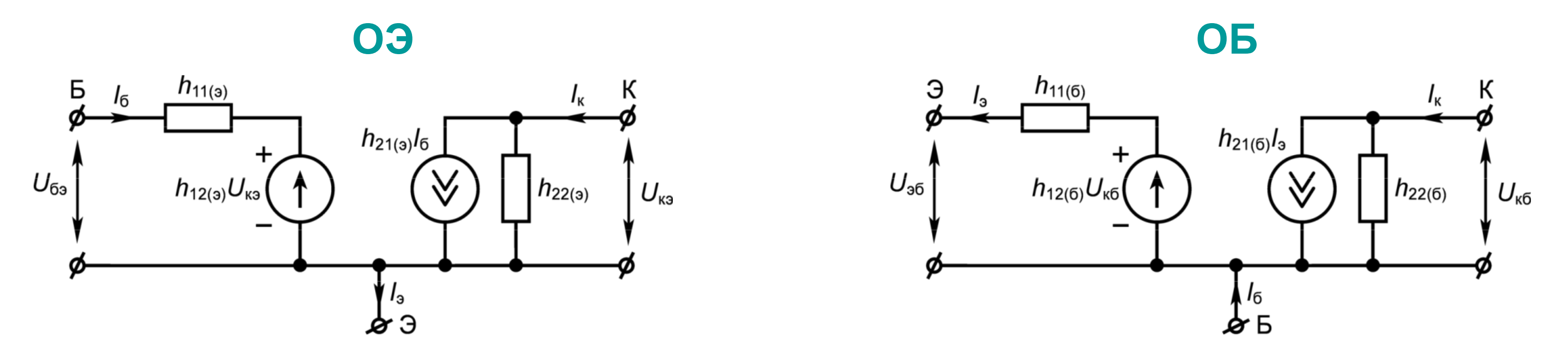
- коэффициент обратной связи по напряжению; определяется по входным характеристикам;

$$h_{22Э} = \left.\frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кэ}}\right|_{I_б=\mathrm{const}}$$

- выходная проводимость транзистора; определяется по выходной характеристике.

Если провести замену соответствующих параметров можно записать *h* – параметры для схемы ОБ. Однако, если известны *h* – параметры для схемы ОЭ, параметры для схемы ОБ получаются простым пересчетом.

Эквивалентные схемы транзистора на средних частотах через *h* – параметры



Показатели схем ОЭ, ОБ и ОК для маломощных транзисторов

Параметр	ОЭ	ОБ	ОК
h_{11}	сотни Ом единицы кОм	единицы десятки Ом	десятки сотни кОм
h_{12}	10^{-3} 10^{-4} См	10^{-3} 10^{-4} См	10^{-3} 10^{-4} См
$\|h_{21}\|$	десятки сотни	0,95 0,998	сх. ОЭ
$1/h_{22}$	единицы десятки кОм	сотни кОм единицы МОм	десятки Ом

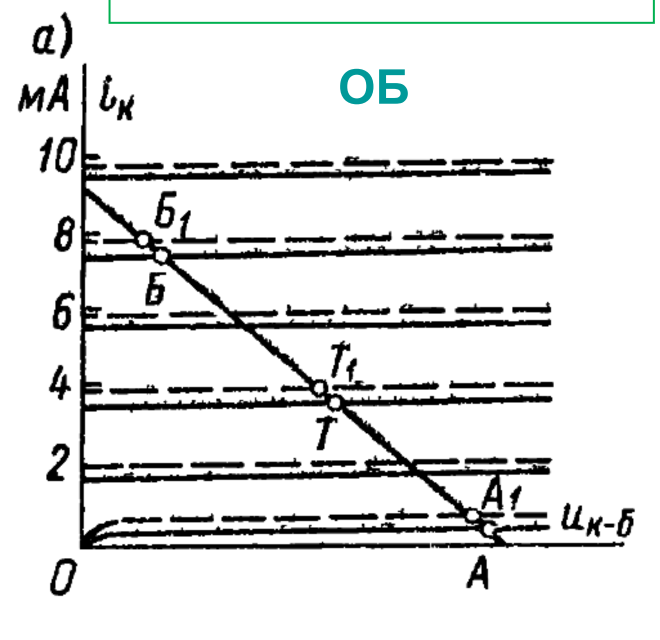
Кроме системы *h* – параметров пользуются также системой параметров в виде проводимостей (*Y* - параметры).

Влияние температуры

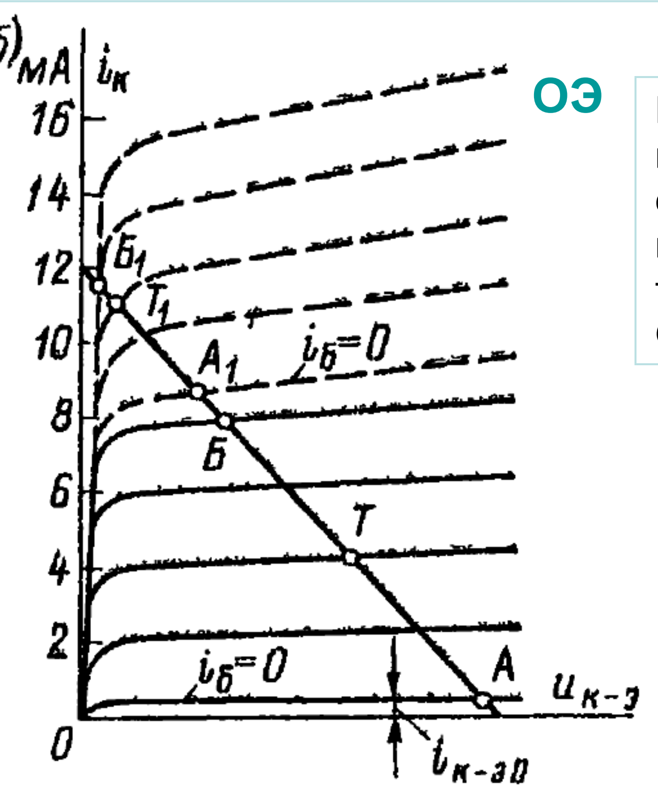
В процессе работы транзисторов в электронной аппаратуре они нагреваются. Причины нагрева транзисторов:

- температура окружающей среды;
- внешние источники тепла (например, находящиеся нагретые детали);
- токи, протекающие через транзистор.

Пунктиром показано изменение тока при увеличении температуры.



$$I_к = \alpha \cdot I_э + I_{к0},$$



$$I_к = \beta \cdot I_б + I_{к0(э)} =$$
$$= \beta \cdot I_б + (1+\beta) I_{к0}$$

При увеличении температуры изменение коллекторного тока в сх. ОЭ более существенно, чем в схеме ОБ. => Схема ОЭ менее температурно стабильна, чем сх. ОБ.

При изменении температуры изменяются все характеристики и параметры транзистора. На практике для минимизации влияния температуры применяют специальные схемные решения: дополнительные цепи термокомпенсации и термостабилизации.

Частотные свойства транзисторов

С увеличением частоты усиление, даваемое транзистором снижается. Существует две главных причины:

1. Влияние емкостей транзистора.
2. Снижение коэффициента передачи тока.

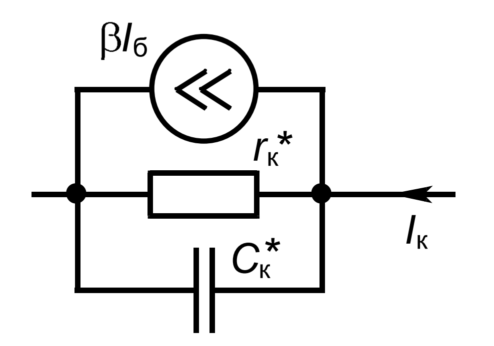
1. Влияние емкостей транзистора

С ростом частоты сопротивление емкостей транзистора уменьшается:

$$X_C \downarrow = \frac{1}{\omega \uparrow C}.$$

Влияние всех емкостей одинаково: они шунтируют цепи транзистора, вызывая тем самым снижение усиления.

Наиболее существенное влияние оказывается емкость коллекторного перехода $C_к$, т.к. имеет наибольшую величину.



Часть малосигнальной схемы замещения. Полная схема на слайде 14

На высоких частотах емкость $C_к$ шунтирует источник коллекторного тока. => часть тока источника тока замыкается через $C_к$, и лишь оставшаяся часть тока источника будет создавать коллекторный ток $I_к$. С ростом частоты ток через $C_к$ возрастает, а ток $I_к$ уменьшается.

2. Снижение коэффициента передачи тока

На высоких частотах коэффициент передачи тока базы β является комплексной величиной:

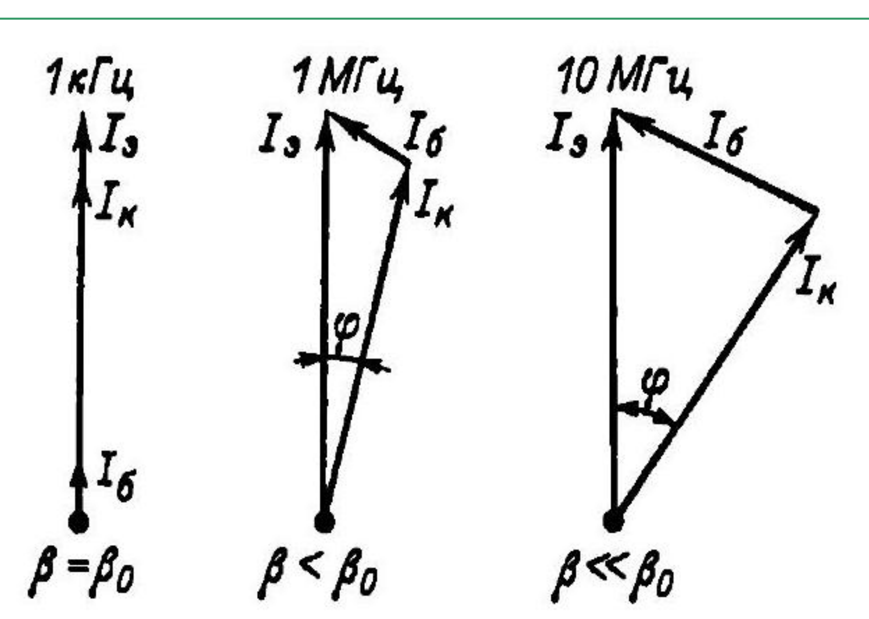
$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1+j\dfrac{\omega}{\omega_\beta}} = \frac{\beta_0}{1+j\dfrac{f}{f_\beta}},$$

f_β (ω_β) – предельная (аналог граничной частоты при определении полосы пропускания цепи) частота коэффициента передачи тока базы транзистора (сх. ОЭ) – справочный параметр;
β_0 – статический коэффициент передачи тока базы (на постоянном токе).

Модуль и фаза коэффициента передачи:

$$\beta(\omega) = \frac{\beta_0}{\sqrt{1+\left(\dfrac{\omega}{\omega_\beta}\right)^2}} = \frac{\beta_0}{\sqrt{1+\left(\dfrac{f}{f_\beta}\right)^2}},$$

$$\varphi_\beta = \mathrm{arctg}\frac{\omega}{\omega_\beta}.$$



Векторные диаграммы, демонстрирующие возрастание тока базы и фазового сдвига между токами с увеличением частоты работы транзистора

Снижение β с ростом частоты с ростом частоты обусловлено инерционностью перемещения носителей из ЭП через базу в КП. Время пробега носителей через базу составляет ≈10^{-7}с. На частотах единицы десятки МГц это время соизмеримо (или больше) с периодом усиливаемого сигнала (т.е. носители не успевают перескочить через базу и задерживаются в ней). В результате коллекторный ток отстает от эмиттерного (появляется фазовый сдвиг) и $I_к$ уменьшается, а ток базы $I_б$ увеличивается.

Для коэффициента передачи тока эмиттера:

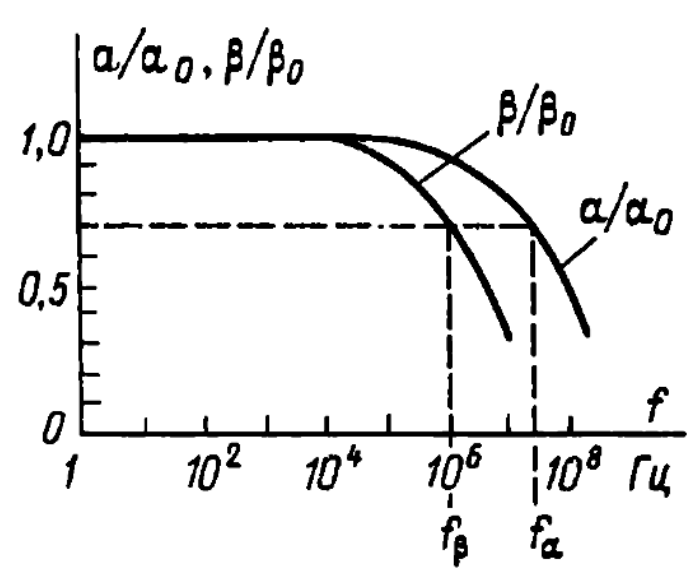
$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_\alpha}}.$$

ω_α– предельная частота коэффициента передачи тока эмиттера транзистора (сх. ОБ) – справочный параметр;
α_0 – статический коэффициент передачи тока базы.

Формулы для пересчета

$$f_\beta = \frac{f_\alpha}{1+\beta} \cong \frac{f_\alpha}{1+\beta}; \quad f_\beta = f_\alpha(1 - \alpha).$$

Очевидно, что предельная частота в схеме ОЭ в (1+β) раз меньше, чем в схеме ОБ, т.е. частотные свойства транзистора при включении по сх. ОБ существенно лучше частотных свойств при включении транзистора по схеме ОЭ.



Зависимость относительного коэффициента передачи тока транзистора

Граничная частота коэффициента передачи тока базы – это частота, на которой β = 1, справочный параметр:

$$f_{гр} = f_\beta\sqrt{\beta_0^2 - 1} \cong f_\beta \cdot \beta_0.$$

f_β – предельная частота коэффициента передачи тока – частота, на которой коэффициент снижается в в 1,41 раза (или на 3 дБ) от максимального значения, т.е.

f_β – предельная частота является аналогом граничной частоты, используемой при определении полосы пропускания цепи по АЧХ

Основные параметры биполярных транзисторов

Эксплуатационные параметры

1. Коэффициенты передачи эмиттерного α или базового β токов.
2. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении на КП:

$$I_{кбо} = I_{к0}$$ (доли мкА   десятки мА)

3. $r_б$ **–** объемное сопротивление базы (сотни Ом);
4. $r_к$ – дифференциальное сопротивление обратно смещенного КП (сотни кОм   единицы МОм) или h_{22} – выходная проводимость;
5. $U_{кн}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер (десятые доли В   единицы В);
6. $C_к$ – емкость обратно смещенного коллекторного перехода (единицы   десятки пФ);
7. R_T - тепловое сопротивление между КП и корпусом $R_T = \Delta T/P_{к\,max}$, где $\Delta T = T_п - T_к$ – перепад температур между переходом и корпусом транзистора;
8. f_β, f_α – предельная частота передачи тока в схеме ОЭ и ОБ, соответственно.

Максимально допустимые параметры

9. $I_{к\,мах}$ – максимально допустимый ток коллектора (сотни мА   десятки А);
10. $U_{кэ\,max}$ – максимально допустимое напряжение К-Э;
11. $P_{к\,max}$ – максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором (до десятков Вт);
12. $U_{бэ\,обр\,max}$ – максимально допустимое обратное напряжение ЭП;
13. $I_{б\,max}$ – максимально допустимый прямой ток базы.

Превышение параметрами предельно-допустимых значений $I_{к\,max}$, $U_{кэ\,max}$, $P_{к\,max}$, $I_{б\,max}$, $U_{бэ\,обр\,max}$ ведет к выходу транзистора из строя.

Рекомендации по выбору и эксплуатации биполярных транзисторов

Выбор биполярных транзисторов осуществляется с учетом эксплуатационных и предельно-допустимых параметров транзисторов (слайд 25) и области применения транзистора.

Однако в большинстве случаев при выборе транзистора достаточно учитывать его максимально допустимые параметры и частотные свойства:

1. $I_{к\ мах}$ – максимально допустимый ток коллектора;
2. $U_{кэ\ max}$ – максимально допустимое напряжение К-Э (ограничивается максимально допустимым напряжением коллекторного перехода);
3. $P_{к\ max}$ – максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором;
4. $U_{бэ\ обр\ max}$ – максимально допустимое обратное напряжение ЭП;
5. $I_{б\ max}$ – максимально допустимый прямой ток базы.
6. f_{β} – предельная частота передачи тока в схеме ОЭ.

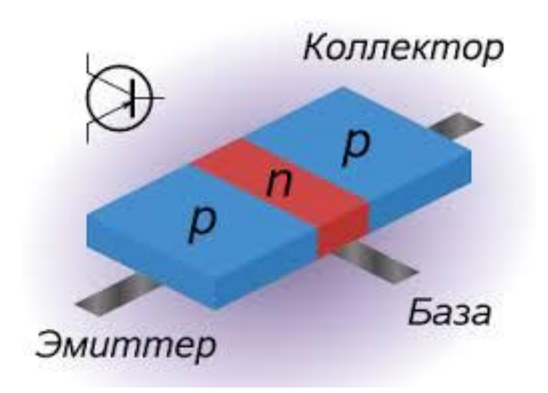
Рекомендация. В целях повышения надежности не эксплуатируйте транзисторы в предельно-допустимых режимах. Используйте облегченные режимы по сравнению допустимыми.

Классификация и система обозначений транзисторов

Самостоятельно по:

1. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.

Составить конспект!



Ссылки

1. http://hightolow.ru
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Альянс, 2008. – 496 с.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.
4. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – М.: Энергия, 1977. – 608 с.
5. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние, 1990. – 352 с.
6. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.